

점토 충전물에 의한 사면파괴 사례연구

김용준, 김선기, 김주화 (대림산업(주))

1. 서 론

암반사면의 파괴는 토사사면과 달리 사면을 구성하는 재료의 강도 보다는 사면내 발달한 불연속면의 방향성에 의해 주로 발생한다. 그러나 절리면의 방향성이 사면의 안정성에 불리하더라도 절리면의 표면이 거칠고 강도가 큰 경우는 사면의 안정성을 유지하고 있다. 일반적으로 붕괴된 불연속면을 따라 파괴가 발생한 사면은 불연속면이 풍화에 의해 강도가 저하되거나 충전물이 포함된 경우가 빈번하다. 그러나 시료 채취나 평가방법의 어려움으로 인해 현장 기술자들이 그 안정성을 평가하기에는 상당한 어려움이 있다.

Hoek & Bray(1981)는 여러 연구자들의 시험 결과를 요약하여 암석과 충전물의 종류에 따른 충전된 절리면의 전단강도 값을 제안하였다. 그러나 제안된 값들은 개략적인 범위이며, 전단강도에 가장 큰 영향을 미치는 절리면의 거칠기, 충전물의 두께 등에 대한 언급이 없어 현장에 적용하기에는 상당한 어려움이 있다.

이에 본 연구에서는 불연속면내에 점토 충전물에 의해 파괴가 발생한 사면에 대해서 파괴원인을 규명하고, 충전물을 포함한 절리면의 전단강도 평가방법에 대해서 고찰하였다.

2. 충전물 분류 및 공학적 특성

2.1 충전물의 분류

충전물은 불연속면에서 인접한 암석 벽면을 분리시키는 물질(ISRM, 1978)로 정의되어지며, 보통 모암 보다 강도가 약한 경우가 대부분이다. 전형적인 충전물로는 모래, 점토, gouge 그리고 압쇄작용에 의해 원암의 광물이 모두 파쇄되어 미립결정의 집합체로 변화된 압쇄암, 압쇄각력암, 단층각력암 등이 있다(Barton, 1974).

Barton(1974)은 충전된 절리면의 발생기원을 변위이력과 하중이력으로 구분하고 충전된 절리면의 특징을 그림 1과 같이 분류하였다. Barton(1974)은 충전물의 발생기원과 다양성을 강조하기 위하여 변위이력에 따라 2가지로 분류하였다. 그리고 하중이력에 따라서 정규

압밀과 과압밀로 구분하여 충전물의 특성에 대하여 언급하였다.

첫 번째 그룹은 오랜 기간에 걸쳐 전단변위를 겪은 것으로써 단층, 전단대, 활동이 발생한 층리면 등이 있다. 이중 점토 압쇄암과 활동이 발생한 층리면 내에 존재하는 충전물은 습곡작용이나 중력에 의해 활동이 발생하는 동안에 불연속면에 존재하는 충전물이 재형성된 것이며 충전물 내에 활동면을 가지고 있다. 그러나 단층, 전단대 내에 존재하는 충전물은 전단과정 중에 모암에서 발생한 각력이나 gouge 등으로 충전되고 풍화의 진행에 따라 세립의 입자로 변질되며, 점토입자는 우세한 응력방향을 따라 방향성을 가지기도 한다.

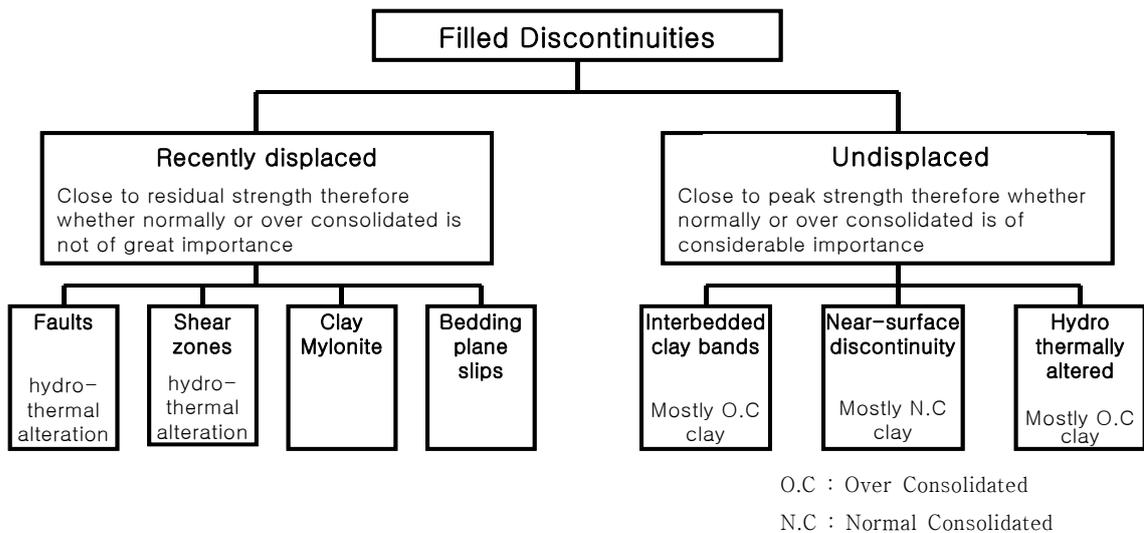


그림 1. 충전물의 분류 (Barton, 1974)

변위가 발생하지 않은 두 번째 그룹은 셰일, 사암, 석회암과 같이 강도가 약한 퇴적암에서는 변질층이나 점토층으로 나타나며, 화강암과 변성암에서는 변질정도에 따라 충전물의 종류가 매우 다양하며, 그 규모도 변성의 저항정도에 따라 폭이 수 mm에서 수 m로 매우 폭 넓게 나타난다. 이때 형성된 점토입자는 정수역학적인 특성 때문에 특정한 방향성을 나타내지는 않는다.

그리고 Barton(1974)은 변위이력에 따른 구분 이외에도 추가적으로 점토 충전물에 대해서 정규압밀인지 과압밀인지 구분하고자 하였다. 이는 굴착에 의한 충전된 절리면에 제하가 발생할 경우 점토층 내에서 발생하는 연화(softening), 팽창(swelling), 간극수압의 변화를 간과하는데 그 구분 근거를 찾을 수 있으며, 공학적인 설계에서 이런 특성을 고려하여야 하는 것으로 언급하고 있다.

2.2 충전물의 전단특성

충전된 절리면은 충전물의 두께가 두꺼울수록 최대전단강도가 발현되는 전단변위는 커지며, 최대강도는 감소한다. 그리고 충전물 두께가 두꺼워질수록 수직변위는 팽창에

서 압축으로 변화한다.

그림 2에 나타난 바에 의하면 연약한 충전물의 분포는 절리면의 전단강도와 강성에 영향을 주며, 전단 동안에 절리면의 돌출부(asperity)의 접촉 발생 유무에 따라 그 특성이 달라진다. 만약 충전물의 두께가 얇다면 암석의 미세한 구조가 지워지더라도 암석의 마찰특성에 의해 지배되며, 이때 기본마찰각(basic friction)은 감소한다. 그러나 충전물이 매우 두껍다면 전단거동은 절리면의 거칠기와는 상관없이 충전물에 의해 그 특성이 나타날 것이다. 그리고 실제 암반에 존재하는 충전된 절리면은 충전물의 불균질한 수평분포, 비정상적인 간극수압, 충전물의 압밀차이(정규압밀, 과압밀), 절리표면의 돌출부의 불규칙적인 분포가 조합되어 예상치 못한 거동을 나타내기도 한다.

Nieto(1974)는 충전된 절리면의 전단거동을 절리면의 돌출부와 충전물의 상호작용에 근거하여 3가지 범주로 구분하였다. 맞물림(interlocking)은 충전물 두께가 매우 얇아서 전단동안에 돌출부의 접촉이 발생하는 경우이며, 간섭(interfering)은 전단동안에 충전물에 의해 돌출부의 접촉은 발생하지 않으나 돌출부의 지형학적인 특성에 의해 충전된 절리면의 강도가 충전물의 강도보다 큰 경우이다. 그리고 충전물이 돌출부 높이 보다 두꺼워 전단동안에 돌출부의 접촉이 발생하지 않고 충전물에 의해 전단특성이 결정되는 것을 비간섭(noninterfering)으로 정의하였다.

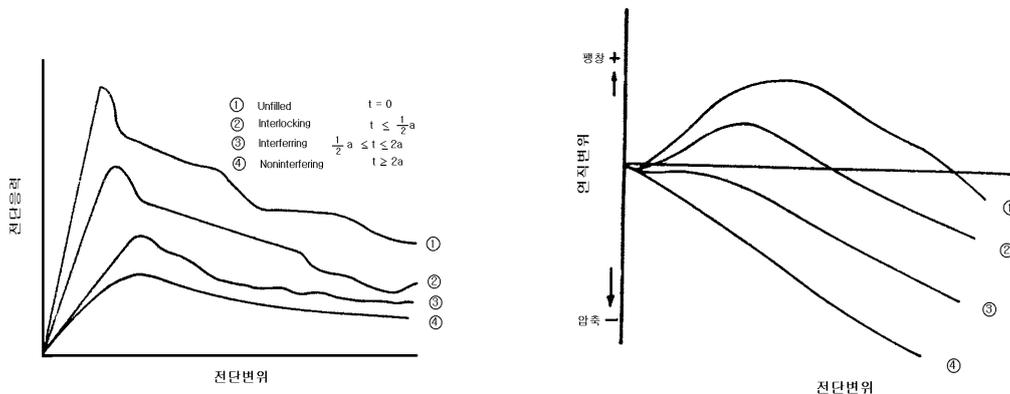


그림 2. 충전된 절리면의 전단특성 (Phien-wej et al, 1990)

2.3 한계 두께비

암석 돌출부와 흙의 상호작용에 의해 복잡한 형상으로 나타나는 충전된 절리면의 공학적 특성을 암반역학과 토질역학의 경계점이 되는 한계치를 구분하는 것은 구조물 설계에 있어 편리하다. 일반적으로 충전물의 두께가 어느 이상이 되면 전단강도값의 변화가 일정해지며, 충전된 절리면의 전단강도는 충전물의 강도와 같게 된다. 이 경계점이 되는 충전물의 두께를 한계두께(critical thickness, t_{crit})라고 한다.

그리고 절리면의 돌출부높이(a)와 한계두께(t_{crit})의 비를 한계두께비(ratio of critical

thickness, t_{crit}/a)라고 하며, 여러 연구자에 의해 얻어진 한계두께비를 표 1에 나타내었으며, 일반적으로 충전물의 종류에 따라 한계두께비(ratio of critical thickness, t_{crit}/a)는 다른 것으로 알려져 있다.

표 1. 충전물에 따른 한계두께비(Toledo & Freitas, 1995)

Class	filling material	ratio of critical thickness (t_{crit} / a)	
		Natural/tension joint	Regular joints (tooth)
Clayey	kaoline	1.0	> 1.0
	kaoline		
	Fault clay		1.0
Granular	mica	1.3	> 1.3
	marble dust		
	fuel ash		1.5
	clayey sand		2.3

(*) Oven-dried bentonite

3. 사면 파괴사례

3.1 사면현황

본 연구의 대상사면은 상부대동계의 칠곡층에 해당하는 사암과 셰일이 호층을 이루고 있으며, 사면 중앙부에 3 ~ 5m 폭으로 관입된 암맥(dyke)이 3군데 나타나고 있다. 대상사면의 총 연장은 280m로써 붕괴가 발생한 구간은 40m 정도이다. 사면의 방향은 N86E/45SW이며, 사면내 발달한 층리의 방향성은 N57E/20SE이다. 그리고 층리의 연장성은 매우 좋으며 사면내 분포하는 불연속면은 4개의 군으로 나뉘어진다.

당초 본 절취사면은 표준횡단면도에 의해 발파암의 사면구배 1 : 0.5로 계획되었으나, 사면에서 발달한 절리에 의해 일부구간에서 붕괴가 발생하여 시공중 사면구배가 1 : 1.0으로 완화되었다. 그 후 집중호우시 사면 내 발달한 층리면(dip 20°)을 따라 사면 중앙부에서 대규모의 평면파괴가 발생하였다. 사면 붕괴현황을 그림 3에 나타내었다.

파괴가 발생한 사면에 대해서 지표지질조사를 수행한 결과, 사면은 적색 셰일과 사암이 호층을 이루며 그 층상이 비교적 뚜렷하였다. 그리고 사면의 1단 소단 상부는 풍화가 매우 심하고 절리면의 간격이 매우 조밀하였다. 그리고 사면내 관입된 암맥은 보통 정도의 풍화를 나타내고 있으며, 그 경계면을 따라 지하수 누수 흔적과 2~10cm 두께의 충전물이 존재하였다. 사면파괴는 층리면과 인장균열에 의해 형성된 블록이 선단에서 층리면을 따라 발생하였다. 파괴사면 하단부에는 상당히 풍화된 연약대가 존재하였으며, 파괴사면 주변에는 활동시 압출된 점토 충전물이 관찰되었다. 그리고 사면상부에는 깊이 15m 정도의 인장균열이 있었으며, 사면 파괴에 의해 폭은 4m 정도였다.

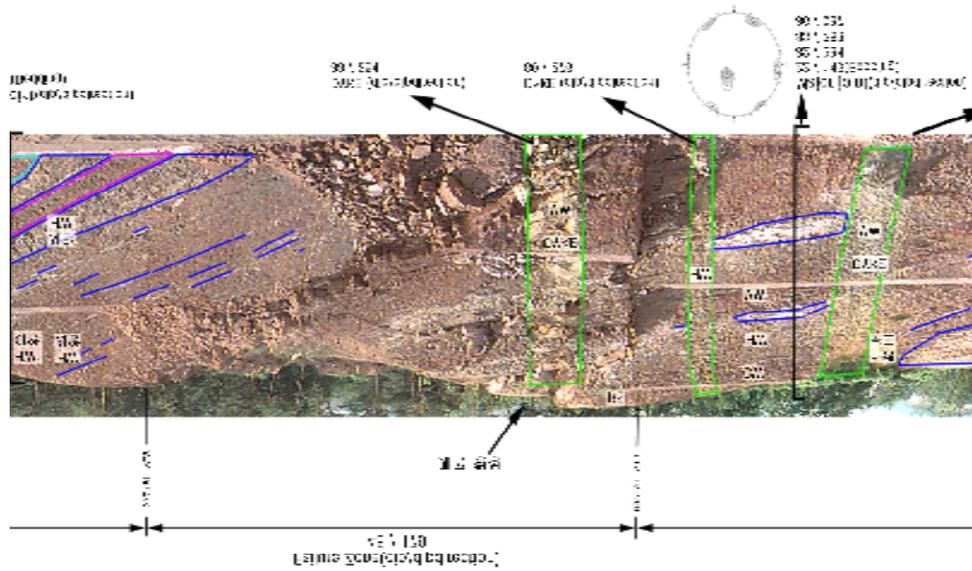


그림 3. 사면파괴 현황



(a) 파괴사면 수평이동



(b) 상부 인장균열

그림 4. 사면파괴 세부사진

파괴사면의 우측에는 평면파괴에 저항력을 갖지 못하는 수직절리가 있었으며, 변위가 발생하지 않은 위치에서 약 2m의 수평변위가 발생하였다. 그리고 평면파괴에 의한 사면의 수평이동 형상과 상부 인장균열 상황을 그림 4에 나타내었다.

3.2 암석의 공학적 특성

암석의 공학적 특성을 파악하기 위하여 대상사면의 시험위치를 그림 5에서 보는 바와 같이 A, B, C, D의 네 개의 구역과 파괴사면으로 나누었다. 그리고 4개 구역에 분포하는 사암과 셰일의 물리, 역학적 특성을 조사하고, 파괴사면에 대해서는 삼축압축시험과 절리면

전단시험을 실시하였다. 시험결과 세일의 단위중량은 2.53~2.67(t/m³)이고 흡수율이 1.45~2.02%의 범위를 나타내었다. 그리고 사암은 단위중량이 2.15~2.51(t/m³)이고 흡수율이 2.17~7.14%를 나타내어 세일보다 높은 값을 나타내었다. 세일과 사암의 시험결과는 표 2와 표 3에 나타내었다. 파괴사면에서 채취한 블록시료에 대해 삼축압축시험과 절리면 전단시험을 수행하고 결과를 표 4에 나타내었다. 그리고 절리면 전단시험은 현장에서 세일의 층리면을 따라 채취한 암석시료에 대해서 충전물이 있는 경우와 없는 경우 2가지로 나누어서 수행하였다. 이때 충전재 두께는 2cm 였으며, 절리면 전단시험 결과 충전된 절리면은 충전되지 않은 절리면에 비해 상당히 낮은 값을 나타내었으며, 충전재의 전단강도와 유사하게 나타났다.



그림 5. 각 구역별 시험위치

표 2. 세일의 시험결과

Zone		단위중량 (t/m ³)	흡수율 (%)	함수비 (%)	Is ₅₀ (kg/cm ²)	Is ₅₀ × 24 (kg/cm ²)	비고
좌측사면	상부	2.64	1.27	0.72	14.83	355.8	
	하부	2.67	1.45	0.85	9.04	217.01	
우측사면	상부	2.58	1.91	1.21	12.04	289.1	
	하부	2.53	2.02	1.30	8.26	198.2	

표 3. 사암의 시험결과

Zone		단위중량 (t/m ³)	흡수율 (%)	함수비 (%)	Is ₅₀ (kg/cm ²)	Is ₅₀ × 24 (kg/cm ²)	비고
사면좌측	상부	2.46	2.77	0.74	29.0	696.0	
	하부	2.51	2.17	0.53	37.08	889.86	
사면우측	상부	2.15	7.14	0.96	21.26	510.2	
	하부	2.25	5.52	0.89	17.28	414.7	

표 4. 삼축압축 및 절리면 전단시험 결과

Zone	암석명	일축압축강도 (kg/cm ²)	삼축압축시험		절리면전단시험			
			c (kg/cm ²)	φ (°)	충전안된 절리면		충전된 절리면	
					c (kg/cm ²)	φ (°)	c (kg/cm ²)	φ (°)
파괴사면	Shale	972.3	150	40.3	0.69	36.1	0.13	22.2

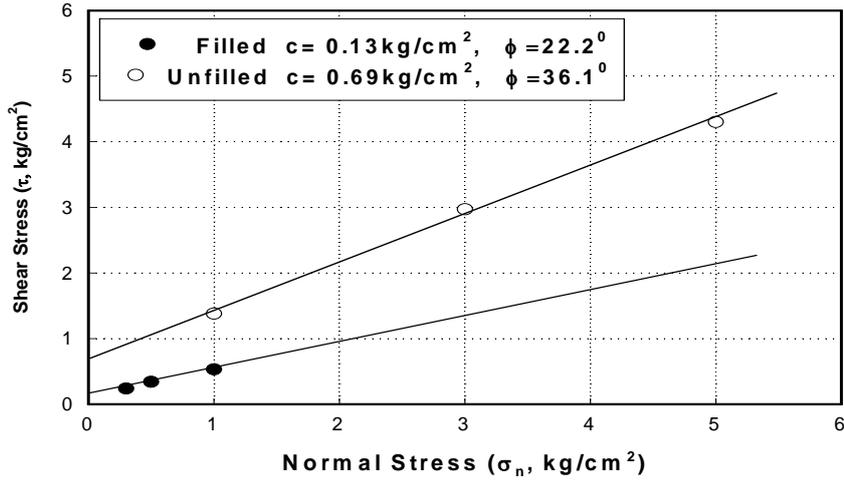


그림 6. 절리면 전단시험 결과

3.3 암반의 강도정수

조사지역에 분포하는 암반층의 공학적인 특성을 파악하기 위하여 Bieniawski(1979)의 기본 RMR 분류를 실시하여 구역별 RMR 값과 삼축압축시험에서 얻은 세일의 m, s 값을 이용하여 암반의 강도를 산정하였다.

표 5. 각 구역별 RMR 분류

		I _{s(50)} (kg/cm ²)	R.Q.D (%)	간격 (mm)	불연속면 상태					지하수	RMR 등급
					연속성	틈	거칠기	충전물	풍화도		
A 사면좌측 하부	Value	9.04	33.8	300	10 ~ 20m	0.1~1.0mm	Smooth	Hard filling > 5mm	MW	Damp	41
	Rating	4	7	9	1	4	1	2	3	10	
B 사면좌측 상부	Value	14.83	23.9	150	> 20m	1~5mm	Smooth	Soft filling > 5mm	HW	Wet	26
	Rating	4	5	7	0	1	1	0	1	7	
C 사면우측 하부	Value	8.26	30.5	280	10 ~ 20m	0.1~1mm	Smooth	Hard filling > 5mm	MW	Damp	39
	Rating	3	6	9	1	4	1	2	3	10	
D 사면우측 상부	Value	12.04	20.6	150	> 20m	1~5mm	Smooth	Soft filling > 5mm	HW	Wet	26
	Rating	4	5	7	0	1	1	0	1	7	

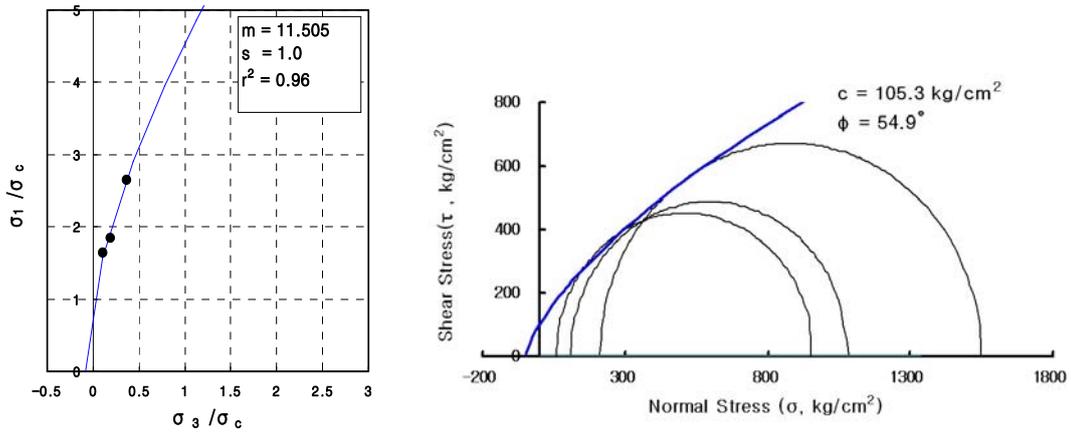


그림 7. 세일의 m, s 값 및 파괴포락선

표 6. 구역별 암반의 강도정수

Slope	Zone	$\sigma_c(I_{s(50)} \times 17)$ (kg/cm ²)	RMR (%)	parameter		Shear Strength	
				m	s	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
좌측사면	A	153.7	41	0.170	5.4E-5	0.21	38.5
	B	252.1	26	0.058	4.4E-6	0.17	35.3
우측사면	C	140.4	39	0.147	3.8E-5	0.2	37.3
	D	204.7	26	0.058	4.4E-6	0.15	34.2

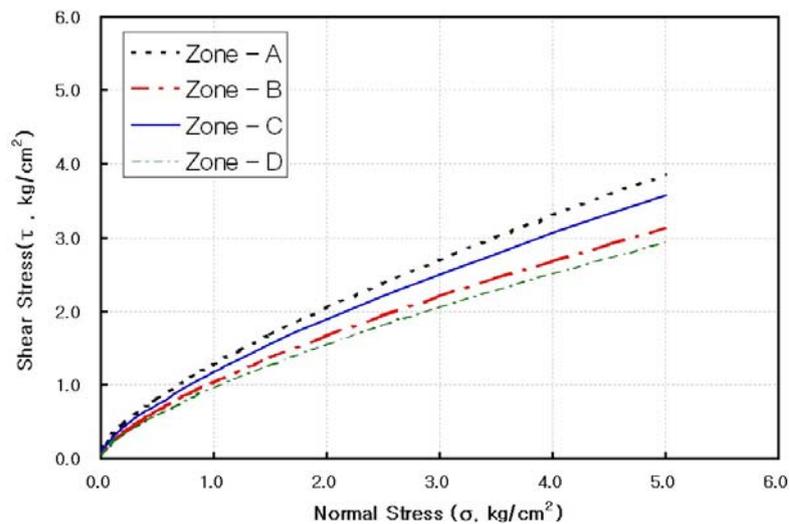


그림 8. 구역별 암반의 파괴포락선

3.3 사면의 파괴 원인

현장조사 결과 파괴면은 사면전단의 층리면과 사면 상부에 발달한 수직절리를 따라 발생

한 인장균열에 의해 형성되는 것으로 판단되어 파괴사면의 형상을 그림 9와 같이 선정하였다. 이러한 파괴면은 파괴사면 제거시 현장에서 조사된 파괴면과 거의 유사하였다.

사면 파괴 원인을 파악하기 위하여 충전물 존재 유무에 따른 전단강도 값과 인장균열의 지하수위 조건을 변화하여, 사면파괴시 전단강도와 인장균열 수위 조건을 검토하였다. 파괴사면의 해석결과를 표 7에 나타내었다. 해석 결과에 의하면 사면 선단으로부터 발달한 층리면 내에 충전물이 없는 경우는 인장균열면 내의 수위가 최대인 경우도 안전율이 1.5를 상회하여 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 층리면에 충전물이 있는 경우는 인장균열 내의 수위가 인장균열 깊이의 절반 정도에서 안전율이 1.04을 나타내어 극한상태에 있는 것을 알 수 있었다. 따라서, 붕괴원인은 층리면을 따라 형성된 점토 충전물과 강우시 인장균열면에 형성된 수위에 의해 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

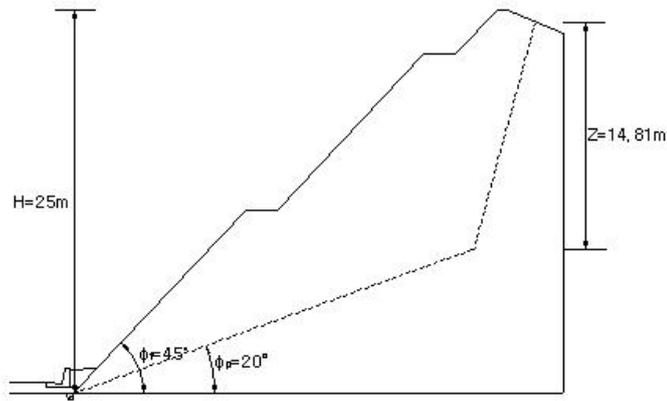


그림 9. 붕괴된 사면의 해석 단면

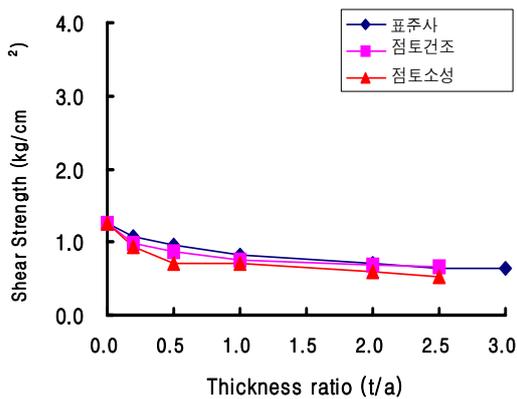
표 7. 파괴사면 해석결과

절리면 상태	물의깊이 (Zw, m)	파괴면길이 (A, m ² /m)	쌓기무게 (W, t/m)	부양력 (U, t/m)	물의힘 (V, t/m)	안전율 (F.S.)
충전된 상태	0	29.24	942.82	0	0	1.28
	7.41	29.24	942.82	109.64	27.45	1.04
	14.81	29.24	942.82	219.29	109.67	0.71
충전되지 않은 상태	0	29.24	942.82	0	0	2.64
	7.41	29.24	942.82	109.64	27.45	2.18
	14.81	29.24	942.82	219.29	109.67	1.54

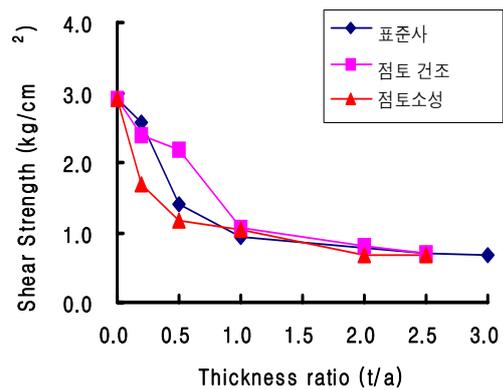
4. 충전물을 포함한 절리면의 전단강도

충전된 절리면은 충전재 두께 증가에 따라 강도가 감소하여 충전재의 강도까지 감소하는 경향이 있다. 그리고 강도감소 경향은 충전재 종류와 절리면의 거칠기에 따라 그 경향이 다소 차이가 있다. 충전된 절리면의 전단강도 특성을 규명하고자 틱니 형상의 일정한 각을 가진 유사암석(rock-like) 시료에 대하여 충전물의 종류와 두께를 변화하여 일련의 실험을 수행하였다. 유사암석 시료는 폭×길이×높이=150×150×100mm, 돌기높이(amplitude) 10mm이고 절리 경사각(i)은 0°, 9°, 15°, 30°이었다. 그리고 표준사, 건조상태의 점토, 소성한계 함수비를 가진 점토 3가지를 충전재로 사용하였다.

그림 10은 충전재 두께가 증가함에 따른 전단강도의 감소경향을 절리 경사각과 충전재 종류에 따라 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 충전재의 강도가 약할수록 작은 두께비에서 강도감소가 더욱 크며, 거칠기가 클수록 전단강도의 감소가 큰 것으로 나타났다. 이러한 특성은 그림 11의 강도 감소율 특성 곡선에서 잘 나타난다.

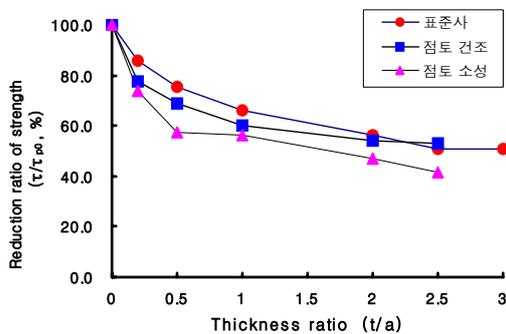


(a) $i = 9^\circ$

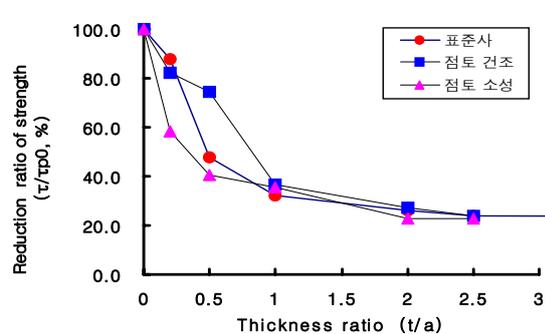


(b) $i = 30^\circ$

그림 10. 충전재 종류에 따른 전단강도의 변화



(a) $i = 9^\circ$



(b) $i = 30^\circ$

그림 11. 충전재 두께에 따른 강도감소율

그림 11은 충전된 절리면의 전단특성 중에서 충전재 두께증가에 따른 전단강도 감소특성을 강도감소율로 나타낸 것이다. 여기서 충전재 두께비에 따른 강도 감소율은 충전되지 않은 절리면의 전단강도에 대한 충전된 절리면의 강도비를 백분율로 나타낸 것이다.

그림 12는 표준사를 충전재로 사용하였을 때, 충전재 두께에 따른 응력비의 변화를 연직 응력과 절리 경사각에 대해서 나타낸 것인데 연직응력이 클수록 응력비는 다소 낮게 나타났다. 그러나 연직응력이나 절리 경사각에 상관없이 거의 하나의 값으로 수렴하는 특성을 알 수 있다. 여기서 최대 전단강도는 깨끗한 절리면의 응력비이고 최소값은 충전재의 응력비이다. 그리고 감소하는 경향은 절리경사각에 따라 거의 유사하며, 연직응력과 충전재의 종류에 관계없이 거의 일정한 특성을 나타내고 있다. 이를 묘사하기 위하여 hyperbolic tangent 함수를 이용하여 전단강도 특성을 식 (1)과 같이 묘사하였다.

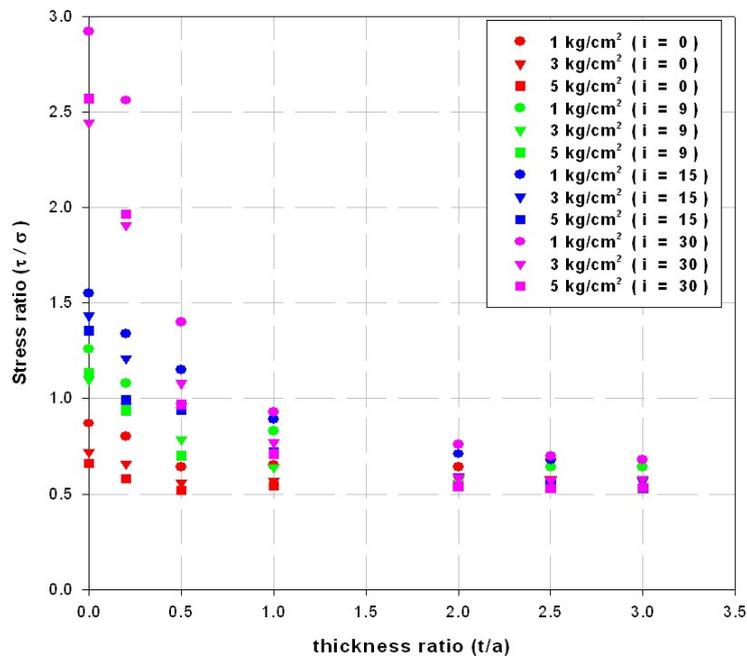


그림 12. 충전재 두께비에 따른 응력비의 관계

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \tanh \left(m \frac{t}{a} \right) \quad (1)$$

- 여기서 μ : 응력비(= τ/σ)
- μ_{\max} : 충전되지 않은 절리면의 응력비
- μ_{\min} : 충전재의 응력비
- t/a : 충전재 두께와 asperity 높이의 비
- m : 상수(degree)

여기서 m 값은 충전된 절리면의 강도감소율을 결정하는 값으로써 충전재 종류와 절리

경사각에 따라 변화하는 값이다. 그리고 hyperbolic tangent 함수의 특성은 m 값이 클수록 최소값에 도달하는 곡선의 기울기가 커지는 특성을 가지고 있다.

본 연구에서 개발된 충전된 절리면의 전단강도 모형을 실제 절리면에서 그 적용성을 검토하기 위하여 Papaligans(1990)가 자연 절리면에서 실험을 통해 얻은 자료에 대해서 digitizer를 이용하여 그 값을 읽고 분석에 사용하였다. Papaligans(1990)는 사암에 대하여 고무를 녹여서 만든 거칠기 형상에 대하여 mold를 제작하고 시멘트를 이용하여 만든 유사 암석에 대하여 충전재의 종류를 대리석 가루와 kaoline을 이용하여 충전재 두께를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 이때 절리의 거칠기는 ISRM(1981)에서 추천한 profile gauge를 이용하여 절리 거칠기와 평균 amplitude를 측정하였다. 측정된 거칠기는 $JRC = 8$, 평균 amplitude는 6.0mm이었다. 본 연구에서 개발한 모델식을 이용하여 Papaligans(1990)의 실험결과와 비교한 특성을 그림 13에 나타내었으며, 제안된 모델식의 예측치는 실측치에 근접함을 알 수 있었다.

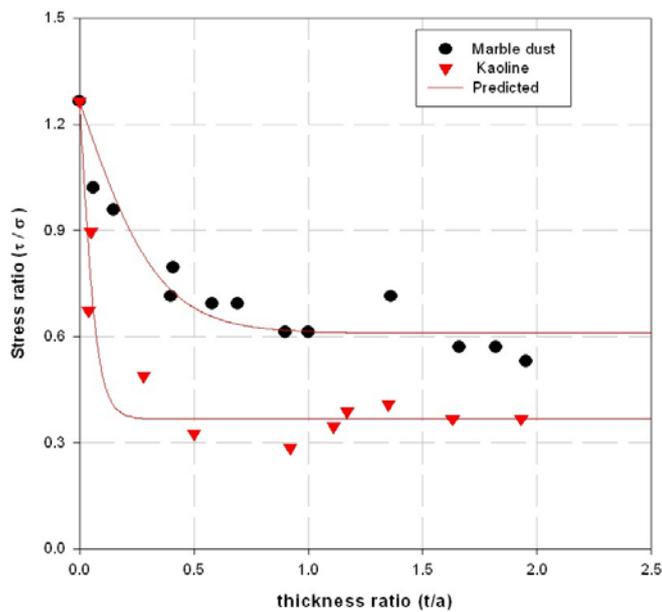


그림 13. 개발된 모델식의 적용

5. 결 론

불연속면내에 존재하는 점토 충전물로 인해 붕괴가 발생한 파괴사면에 대해서 파괴사례를 규명하고, 충전물을 포함한 불연속면의 전단강도 평가방법에 대해서 고찰하고 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 사면파괴 현황

본 연구의 대상사면은 상부대동계의 칠곡층에 해당하는 사암과 세일이 호층을 이루고 있

으며, 집중호우시 사면 내 발달한 층리면을 따라 사면 중앙부에서 대규모의 평면파괴가 발생하였다. 파괴사면 주변은 지하수 누수 흔적과 점토층의 충전물이 존재하였다. 그리고 사면상부에는 깊이 15m 정도의 인장균열이 있었으며, 사면 파괴에 의해 인장균열 폭은 4m로 확대되어 있었다. 그리고 파괴사면은 약 2m정도의 수평변위가 발생하였다.

2) 사면파괴 원인

파괴사면의 해석결과, 불연속면내에 충전물이 없는 경우는 인장균열의 수위가 사면상부 15m까지 상승하여도 안전율이 1.5를 상회하여 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 충전물이 있는 경우는 수위가 인장균열 깊이의 절반 정도에서 안전율이 1.04를 나타내었다. 따라서 붕괴원인은 층리면을 따라 형성된 점토 충전재의 낮은 전단강도와 강우시 인장균열내 형성된 수압에 의해 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

3) 충전된 불연속면의 전단강도 평가

충전된 불연속면의 전단강도는 불연속면의 거칠기, 충전물 종류, 두께 등에 따라 변화한다. 그러나 한계두께비 이후에는 전단강도가 일정해지는 특성이 있으므로, 한계두께비 이후는 충전물의 전단강도를 적용하여도 된다. 그리고 충전물 두께가 한계두께비 보다 작은 경우는 강도감소율이나 실험식에 의해 전단강도를 산정하여 그 안정성을 평가할 수 있다.

■ 참고문헌 ■

1. Barton N., 1974, Review of a new shear strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Vol. 7, 287-332.
2. Bieniawski Z. T., 1979, The geomechanics classification in rock engineering application, Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech., ISRM, Montrteux, Vol. 2, pp. 51-58.
3. Hoek, E. and Brown, E. T., 1980, Empirical strength criterion for rock masses, J. Geotech. Engng Div. ASCE 106(GT9), pp. 1023-1035.
4. Nieto, A. S., 1974, Experimental study of the shear stress-strain behavior of clay seams in rock masses, Ph. D. Thesis, University of Illinois.
5. Phien-wej, N., Shrestha, U. B. and Rantucci, G., 1990, Effect of infill thickness on shear behaviour of rock joints, Proc. Int. Conf. on rock joints, Leon, Norway, pp. 289-294.
6. Toledo and Freitas, 1995, The peak shear strength of filled joints, Fractured and jointed rock masses, Balkema, pp. 385-392.